doi:10.13866/j.azr.2019.05.21

中国北方典型荒漠区生长季降水特征和归一化植被指数的关系①

李亚峰[1,2,3]，　唐立松[1,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点试验室，新疆 乌鲁木齐　830011；
2. 中国科学院大学，北京　100049；3. 中国科学院阜康荒漠生态系统研究站，新疆 阜康　831500）

摘　要： 植物生长季内的降水变化是造成植物生长产生年际变异的重要因素，降水量、分配方式以及集中程度和时间是降水变化的重要特征。利用2000—2017年的MODIS归一化植被数据集和4个样点植物生长季（5—9月）的日降水数据，分析了研究区 $NDVI_{max}$ 与降水特征的相关性。结果表明：2000—2017年研究区4个样点的 $NDVI_{max}$ 均呈上升趋势；生长季降水量呈现出两侧降水增加，中间降水减少的趋势；降水集中度（PCD）西部增高，东部降低；研究区的降水集中期（PCP）都有延后的趋势。4个地区中除榆林外，其他3个地点的PCD与PCP对 $NDVI_{max}$ 的影响均大于生长季降水量，说明这3个地点的 $NDVI_{max}$ 值的年际变化主要取决于PCD与PCP的变动，且均为正相关关系，即降水越集中越有利于 $NDVI_{max}$ 的增加；榆林地区的 $NDVI_{max}$ 与生长季降水量的偏相关结果为正相关，与PCD为负相关，且与生长季降水量的相关性最强，说明该地区植物对生长季降水量更敏感，降水越均匀越有利于该地区植物的生长。

关键词： NDVI；植物生长季；降水变化；降水集中度；降水集中期；荒漠区

降水特征是影响一个地区植物生长的主要因素之一[1]，特别是在干旱地区，它对区域水资源时空分布、生态环境形成与演变起着决定性的作用。大量适时的降水可以驱动许多重要的生态学过程[2]。降水特征的变化主要可分为降水量的变化和降水结构的变化，其中降水结构主要指降水时段内水量分配的变化和发生时间的变化[3]。在干旱区植被与降水关系的相关研究中，大部分都集中在年降水、月降水和极端降水的变化上[4-5]，关于降水在年际内的分配，特别是生长季降水变化的相关研究还较少，而荒漠生态系统对于降水在时间上的变异又极为敏感。因此，本研究在分析2000—2017年研究区降水年际和年内变化特征的基础上，结合归一化植被指数（NDVI）的变化，分析植被对降水变化的响应特征，以期为该区域的生态环境可持续发展提供科学依据。

针对植被对降水的响应，不同的学者从各种时间尺度上做了大量的研究。郑艺等[6]和韩辉邦等[7]基于长时间序列卫星遥感数据GIMMS3g NDVI从不同空间尺度上，分析了植被时空变化及其对气候和人文等非气候因子的响应。焦伟等[8]利用2000—2014年的MODIS NDVI数据和改进的CASA模型估算了西北干旱区的NPP，并分析了NPP的时空变化特征。结果表明植被NPP与降水的相关性高于气温，不同植被类型与气候因子的相关性具有差异性。Roerink等[9]通过NOAA/AVHRRNDVI影像和降水数据的相关性分析表明，在干旱区植被对降水的响应相当敏感。

植被动态变化是土地生产力变化的重要反映，而NDVI作为表征植被动态变化的重要指标，与植被覆盖度、叶面积指数、植被生产力等密切相关，是目前植被监测最常用的指标之一[10-12]。NDVI最大值（$NDVI_{max}$）可反映本年度植物生长所达到的最佳状况，且与地上生物量有很好的相关关系，可以代表植被当年的生长状况[13-15]。目前，关于降水分配和集中时间的研究多是通过对气象站点数据进行空间插值得到栅格气象数据，并与NDVI栅格数据进行相关性分析，但对于气象站点稀少且分布不均的荒

① **收稿日期：** 2018-12-13；　**修订日期：** 2019-03-04
基金项目： 国家自然科学基金项目（41671051）资助
作者简介： 李亚峰（1992-），男，在读硕士研究生，主要方向为植物水分关系研究. E-mail：2663480084@qq.com
通讯作者： 唐立松. E-mail：tangls@ms.xjb.ac.cn

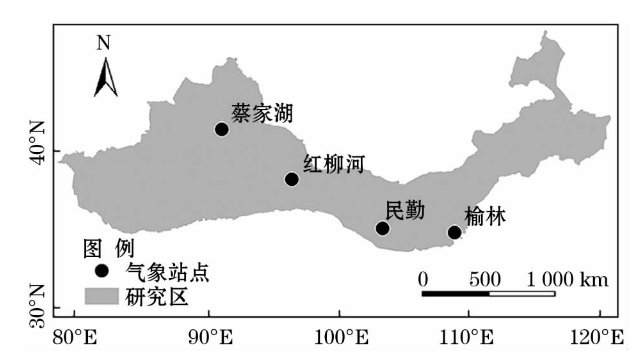
漠区来说,很难得到精度较高的栅格气象数据。由此,本研究基于 18 a 的 MODIS NDVI 数据,以气象站点周围 50 km 缓冲区内 NDVI 的平均值作为该气象站点所对应的 NDVI 序列,以 $NDVI_{max}$ 来表征研究区植物的生长状况;采用降水集中度(PCD)和降水集中期(PCP)来度量生长季(5—9 月)降水的非均匀分配特征;探讨荒漠区植被与降水特征变化的响应规律。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

中国北方荒漠区属中国综合自然区划中的西北区和内蒙区,以贺兰山为分界[16]。行政区划包括新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏全部,山西、河北、陕西的部分地区,其面积约占全国总面积的 1/3。在研究区范围的具体确定上结合了徐利岗等[17]提出的北方荒漠区的边界方案,并参考了中国沙漠 1∶100 000 分布图集,以及中国 1∶1 000 000植被类型空间分布数据。包含有极端干旱、干旱、半干旱和半湿润等不同类型的地区, 区内还分布有我国四大沙漠(塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴旦吉林沙漠和腾格里沙漠)和四大沙地(毛乌素沙地、浑善达克沙地、科尔沁沙地和呼伦贝尔沙地)。西风带与季风是影响我国气候的两大环流系统,西风带与季风的相互作用影响着中国西北地区的大气水汽输送过程, 而大气水汽输送过程的变化控制着成云降水的水分汇聚条件与大气垂直运动条件。由于西北地区的水汽输送分布形势是“一高一中夹一低” 的东西向带状分布[18],为了解不同区域降水特征变化与植被动态变化的关系,选取受了中纬度西风带和季风影响的中国北方干旱区四个典型荒漠区为主要研究地点(图 1)。

4 个气象站周围主要的植被类型见表 1。研究区东西跨度较大,植被类型多样,主要包括温带半灌木、矮半灌木荒漠;温带灌木荒漠;温带丛生禾草典型草原。蔡家湖、红柳河和民勤 3 个站点的植被类型主要是温带半灌木、矮半灌木荒漠和温带灌木荒漠为主。半灌木、矮半灌木荒漠主要分布于中国温带荒漠区的西北部,群落中各植物种具有超旱化的特征。常见的植被有红砂属(*Reaumuria*)、猪毛菜属(*Salsola*)、合头草属(*Sympegma*)、假木贼属(*Anabasis*)、绢蒿属(*Seriphidium*)和蒿属(*Artemisia*)等。温带灌木荒漠广泛分布于中国温带荒漠地区,在中亚也分布广泛。常见的群落是以麻黄属(*Ephedra*)、沙拐枣属(*Calligonum*)、白刺属(*Nitraria*)、裸果木属(*Gymnocarpos*)和柽柳属(*Tamarix*)等为主。最东边的榆林站点主要植被类型是温带丛生禾草典型草原,主要分布于中国温带草甸草原区域的西北侧。



注:数据来源于国家自然科学基金委员“中国西部环境与生态环境科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)和中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。

图 1 研究区站点示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

研究区 2000—2017 年 NDVI 的年内变化规律见图 2,从图 2 可以看出,红柳河、蔡家湖、民勤和榆林 4 个站点,除了红柳河之外,3 个站点 NDVI 的季节变化特征都比较明显,生长季多在 4—10 月之间,红柳河没有明显的季节变化特征,NDVI 值相对较低;蔡家湖站一年当中 NDVI 最小值在 2 月,其他 3 个站点一年当中 NDVI 最小值均出现在 1 月,这是由于蔡家湖所在的古尔班通古特沙漠特殊的地形、

表 1 研究区 4 个气象站点状况

Tab. 1 Information of the four meteorological stations in the study area

站点	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	年均降水量/mm	气象站周围主要植物类型	沙漠(沙地)类型
蔡家湖	44°12′	87°32′	440.5	144.1	温带半灌木、矮半灌木荒漠	半固定、固定沙地
红柳河	41°32′	94°40′	1 573.8	48.4	温带灌木荒漠	戈壁、半固定沙地
民勤	38°38′	103°05′	1 367.5	114.2	温带灌木荒漠;温带半灌木、矮半灌木荒漠	流动沙地、半固定沙地
榆林	38°16′	109°47′	1 157.0	413.3	温带丛生禾草典型草原	半流动沙地、半固定沙地

注:经纬度、海拔数据来源于国家气象局发布的中国气象台站基本信息(1951—2005 年);年降水为 1958—2017 年的降水均值。

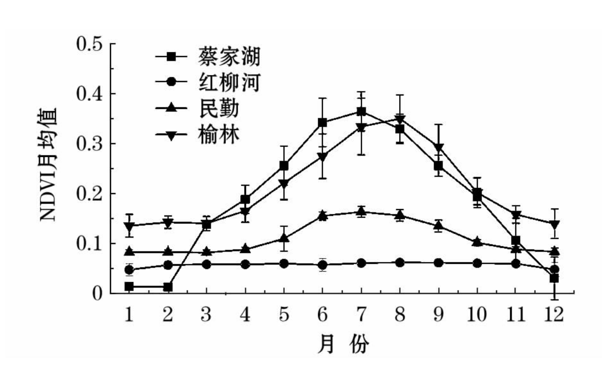


图 2 2000—2017 年研究区 4 个气象站 NDVI 年内变化

Tab. 2 Variation of NDVI at the four meteorological stations in the study area from 2000 to 2017

气候和下垫面条件,冬季大量植被因积雪覆盖,使得 NDVI 数值较低。

1.2 数据来源

降水数据共选取了研究区 4 个气象站点:蔡家湖、红柳河、民勤、榆林,2000—2017 年的逐日降水实测资料(来源于国家气象科学数据共享服务平台 http://data.cma.cn),研究时段为每年的 5—9 月。

NDVI 数据为 MODIS13Q1 级 2000—2017 年 NDVI 产品数据,数据来自 NASA 官网(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/),数据格式为 EOS-HDF,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m。使用 MODIS 投影转换工具 MRT 软件将下载数据由 HDF 格式转为 GEOTIFF,并对影像进行拼接和投影转换;利用 ArcGIS 栅格计算器的 Con 函数,将转格式后的影像进行无效值剔除、真值还原;采用国际通用的 MVC 最大值法,进一步去除残云、残雾、云影和地形阴影等对 NDVI 造成的影响。以气象站点为中心,50 km 为半径做缓冲区,采用最大合成法(MVC)取月最大值作为该月 NDVI 的值,一年中 NDVI 的最大值即为 $NDVI_{max}$,建立 4 个气象站 2000—2017 年的 NDVI 时间序列数据集。

2 研究方法

降水集中度(PCD)和集中期(PCP)是利用向量分析的原理定义区域降水量时间分配特征的参数[19],其中 PCD 能够反映研究时段内降水的集中程度,PCP 则可以反映一年中最大降水量出现的时段,该指标能够较好反映降水量在时间分布上的非均匀性,并被广泛应用于我国东北[20]、华北[21]、新疆[22]等地区的降水特征分析。具体公式为:

$$PCD = \sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2} / R_i \quad (1)$$

$$PCP = \arctan(R_{xi} / R_{yi}) \quad (2)$$

式中:$R_{xi} = \sum_{j=1}^{n} r_{ij} \cdot \sin\theta_j$;$R_{yi} = \sum_{j=1}^{n} r_{ij} \cdot \cos\theta_j$,本文以日为研究单位,$R_i$ 为某个站点研究时段内总降水量(mm);R_{xi}、R_{yi}分别为研究时段内水平和垂直方向的降水量(mm);r_{ij}为研究时段内每一日的降水量;θ 为研究时段内每日所对应的方位角;i 为年份序列,j 为研究时段内的日序($j = 1, 2, \cdots, 153$)。公式(1)反映降水总量在研究时段内降水的集中程度,取值在 0.0~1.0 之间,PCD 值越接近 1,表明降水量越集中在某一时间段;相反 PCD 值越接近 0,表明各降水量越均匀。公式(2)计算了向量的方位角,指出了向量合成后重心指示的角度,反映了最大降水量出现的时段。

在对 $NDVI_{max}$ 指数和降水特征参数进行标准化之后,分别对年降水、降水集中度和集中期与 NDVI 的关系进行偏相关分析,以消除年降水、降水集中度、集中期三者之间的相互影响。

3 结果与分析

3.1 生长季降水变化特征

由图 3 可以看出,2000—2017 年 4 个研究站点生长季降水量的空间变化,呈现出东西两侧升高,中间 2 个站点降低的趋势。其中,位于东部的榆林降水量最高,生长季降水量多年平均值达到 375.95 mm,位于西部的蔡家湖生长季降水量多年平均值为 77.12 mm,2 个站点均呈现略微增长的趋势;而位于中间的红柳河站生长季多年平均降水量仅为 37.7 mm,为 4 个站点的最低值,民勤站生长季多年平均降水量为 101.1 mm,且有逐年降低的趋势。

从图 4 可以看出,2000—2017 年 4 个研究站点生长季 PCD 的空间变化呈现出中部高两侧低的趋势;时间变化上则呈现西部 2 个站点增加,东部降低的趋势,但是变化特征并不显著。西部的蔡家湖站 PCD 值最低,多年平均值为 0.317,有逐渐增高的趋势,说明该地降水的年内分配趋于集中。

从图 5 可以看出,研究区的 4 个站点生长季 PCP 都有增大的趋势,表明降水时间有不同程度的后移。位于西部的蔡家湖站和红柳河站的 PCP 多年平均值在 93 d(8 月 1 日)左右;东部的榆林站和民勤站的 PCP多年平均值为87 d(7月26日)和84

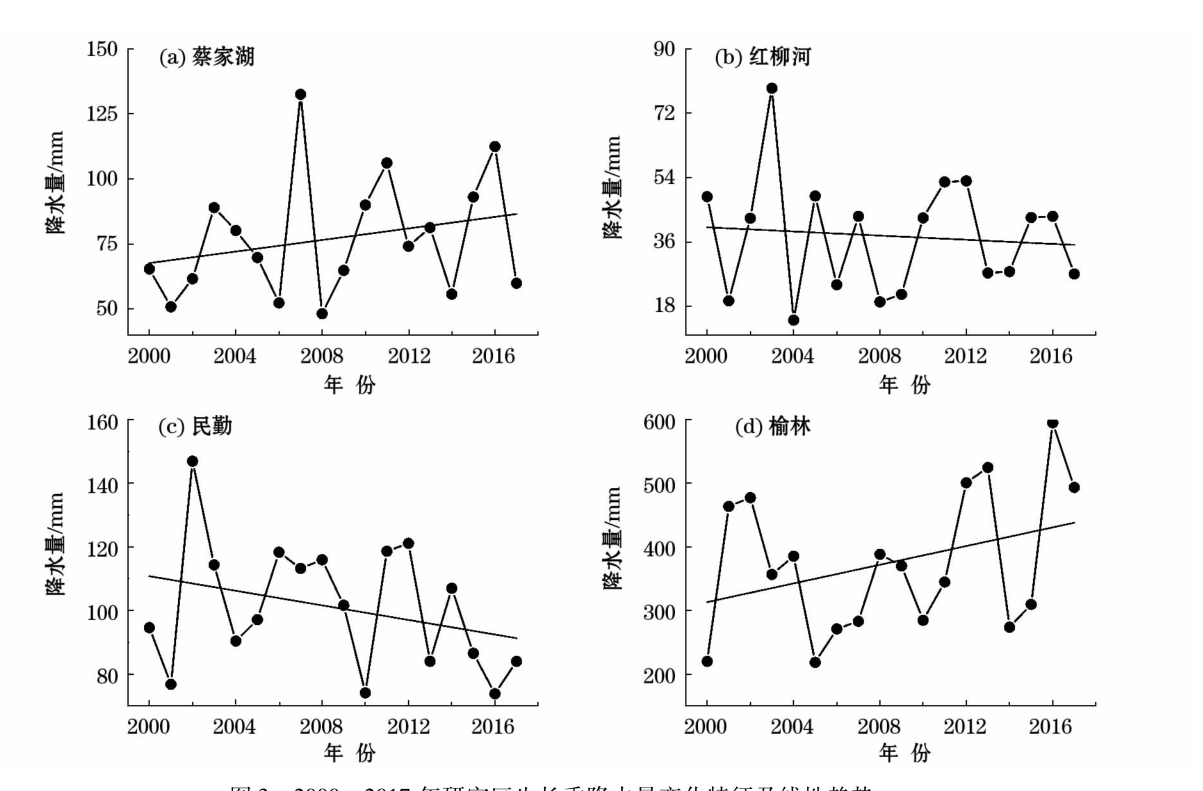


图 3　2000—2017 年研究区生长季降水量变化特征及线性趋势

Fig. 3　Variation and linear trend of precipitation in vegetation growing season in the study area from 2000 to 2017

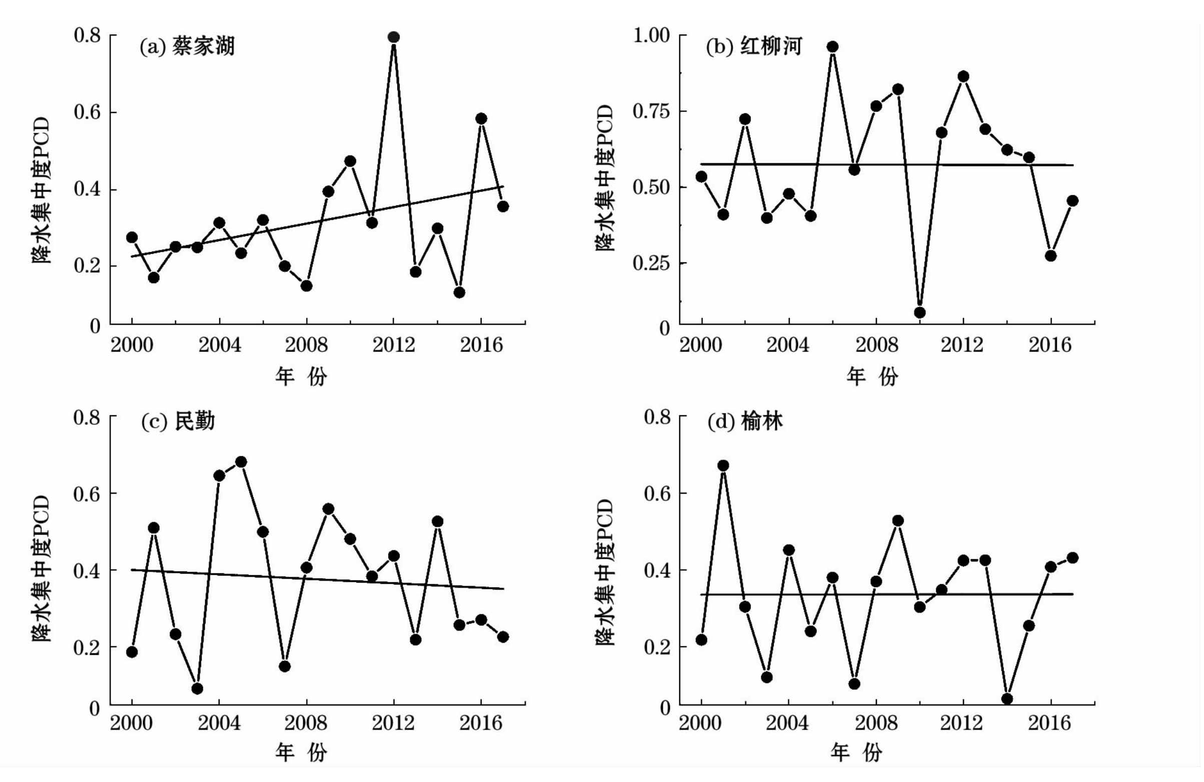


图 4　2000—2017 年研究区生长季降水集中度变化及线性趋势

Fig. 4　Variation and linear trend of precipitation concentration in vegetation growing season in the study area from 2000 to 2017

d(7 月 23 日);相比于其他几个地区榆林站的 PCP 年际变化较小,说明榆林站生长季的降水集中期比较稳定。

3.2　植被指数变化特征

由图 6 可以看出,2000—2017 年研究区 4 个站点 $NDVI_{max}$ 均表现出显著地增长趋势,并且通过了

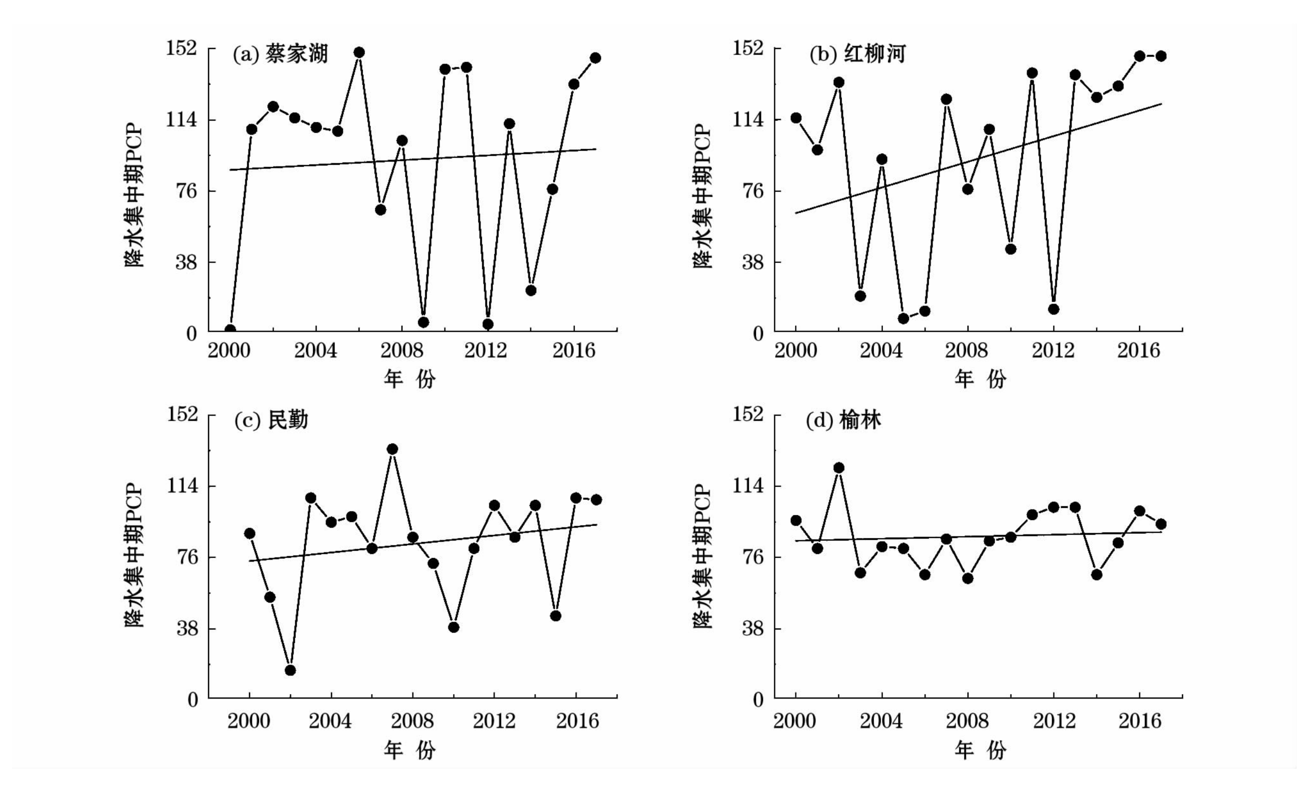


图 5　2000—2017 年研究区生长季降水集中期变化特征及线性趋势

Fig. 5　Variation and linear trend of precipitation concentration period in vegetation growing season in the study area from 2000 to 2017

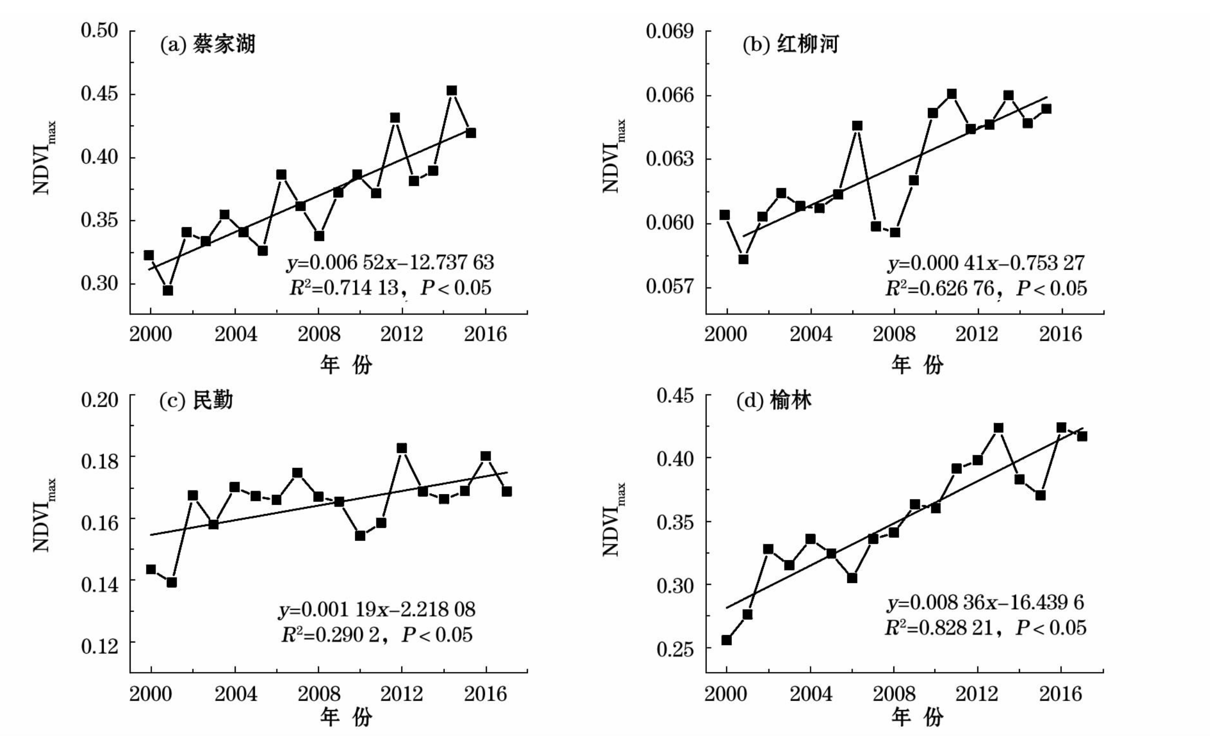


图 6　研究区 $NDVI_{max}$ 年际变化及线性趋势

Fig. 6　Inter-annual fluctuation and linear trend of $NDVI_{max}$ in the study area from 2000 to 2017

0.05 水平的显著性检验，$NDVI_{max}$ 值在时间序列上呈较好的一致性，说明研究区植物生长状况在逐渐向好。4 个站点的植物生长状况最好的是蔡家湖站，NDVI 年际最大值为 0.453，出现在 2016 年，最小值为 0.295，出现在 2001 年；其次是榆林站 NDVI 最大值为 0.424，同样出现在 2016 年，最小值为

0.256,出现在 2000 年;民勤站的 NDVI 最大值为 0.183,出现在 2012 年,最小值为 0.139,出现在 2001 年;植被状况最差的是红柳河站,NDVI 最大值为 0.066,出现在 2012 年,最小值为 0.058,出现在 2001 年且年际波动较大。很显然 4 个站点 $NDVI_{max}$ 的波动在很大程度上具有一致性,空间分布上表现出东西两边高中间低的格局。榆林站 $NDVI_{max}$ 的增长速度最快,达到了 0.083 6・$(10a)^{-1}$;其次是蔡家湖站和民勤站,分别达到了 0.065 2・$(10a)^{-1}$ 和 0.011 9・$(10a)^{-1}$;增长最慢的是红柳河站,为 0.004 1・$(10a)^{-1}$。

3.3 $NDVI_{max}$ 与生长季降水特征指数的相关分析

由表 2 可知,蔡家湖地区的 PCD 和降水量与 $NDVI_{max}$ 的偏相关分析结果呈显著正相关,且 PCD 与 $NDVI_{max}$ 的相关性大于降水量;红柳河地区的 $NDVI_{max}$ 与降水特征指数的相关分析表明, $NDVI_{max}$ 与降水量和 PCP 的相关性最强,其次是降水量;民勤地区的 $NDVI_{max}$ 与 PCP 的相关性最强;榆林地区的 $NDVI_{max}$ 与降水量的相关性最强,与 PCD 的关系呈负相关。4 个地区中除榆林外,其他 3 个地点的 PCD 与 PCP 对 $NDVI_{max}$ 的影响均大于降水量,说明这 3 个地点的 $NDVI_{max}$ 值的年际变化主要取决于 PCD 与 PCP 的变动,且均为正相关关系;榆林地区的 $NDVI_{max}$ 与降水量的偏相关为正相关,与 PCD 为负相关,且与降水量的相关性最强,说明该地区植物对生长季降水量的变化更为敏感。

表 2 $NDVI_{max}$ 与生长季降水特征指数的相关与偏相关系数

Tab. 2 Correlation and partial correlation coefficients between $NDVI_{max}$ and precipitation in vegetation growing season

研究站点	降水量		降水集中度 PCD		降水集中期 PCP	
	相关系数	偏相关系数	相关系数	偏相关系数	相关系数	偏相关系数
蔡家湖	0.513*	0.483	0.262*	0.676*	0.209	0.236
红柳河	0.273	0.421*	0.037	0.181	0.302	0.429*
民勤	0.221	0.055	0.287*	0.186	0.024	0.051
榆林	0.549*	0.561*	0.087	-0.334*	0.309*	-0.007

注:* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

4 讨 论

4.1 生长季降水特征的变化

研究区生长季的降水量总体呈东西 2 个站点增加,中间 2 个站点减少的趋势特征。Li 和 Wang 等[23-24]也研究了中国北方干旱地区降水的变化特征(1960—2010 年),认为山区增湿显著,而极度干旱的荒漠腹地地区增湿并不明显。降水的时空格局演变受到诸多因素的影响,地理位置和地形是形成空间分布格局的主要因素。北方荒漠区东部没有高山阻挡,来自孟加拉湾、南海及西太平洋的大量水汽被输送到河套及内蒙古地区,使得当地降水偏多;西部受纬向环流和西风环流的影响,导致该地降水也相对较多;而位于中部的红柳河站由于受地形和环流的影响降水偏少。

PCD 的空间变化呈现出中部高两侧低,时间变化上则呈东西部 2 个站点增高,中部降低的趋势,但是变化特征并不显著。这可能是由于研究区东西两侧受夏季风北边缘带[25]和西风环流的影响降水频次较多,导致生长季降水量相对分散;中部的红柳河和民勤远离水汽源地,更多地受制于地形和极端气候的影响,导致其降水集中度偏高。西部的蔡家湖生长季降水趋于集中;中东部的民勤和红柳河则趋向于减小,降水在年内的分配趋于均匀。西部蔡家湖地区降水量增大的同时,降水集中程度也有所增加,表明这些区域高强度降水的增加大于低强度降水。郑新倩等[26]的研究指出,近 50 多年来,准噶尔盆地南缘小降水脉冲呈下降趋势,而大脉冲则显著增加,降水脉冲在放大,与本文结论相一致。李奇虎等[27]的研究也证明这点,1960—2010 年西北干旱区单次强降水的强度增加,强降水发生频次增多。

PCP 在 4 个研究站点均有增大的趋势,说明降水集中时间有延后的趋势。PCP 基本都有延后的趋势,这可能与气温上升导致的区域水循环改变有关[28]。

4.2 生长季降水特征变化对植被影响的差异

研究区内 4 个站点的植被对降水特征变化表现出了不同的响应特征。除榆林外,其他 3 个站点的 PCD 和 PCP 对 $NDVI_{max}$ 的影响均大于生长季降水量。蔡家湖地区的 $NDVI_{max}$ 与 PCD 和生长季降水量表现出显著的正相关关系,表明在该地区降水趋于集中,对植物生长具有促进作用。这可能是由于蔡家湖站位于古尔班通古特沙漠南缘,受西风带和北冰洋水汽的影响,冬春多雨雪,春季积雪融化,有利于大量短命植物的萌发[29]。本地区草本植物虽然在优势度上低于灌木群落,但其群落多样性、丰富度大于灌木群落[30],短命植物受表层土壤水的影响较

大,对降水特别是小量级降水(≤5 mm)十分敏感,而古尔班通古特沙漠南缘的小降水脉冲(≤5 mm)占到全年总降水频次的 87.5%[31],降水在短命植物生长期的相对集中,必然会对短命植物的生长产生积极影响。

由表 1 可知蔡家湖站、红柳河和民勤 3 个站点的主要植物群落类型为温带半灌木、矮半灌木荒漠和温带灌木荒漠等为主的荒漠植物,旱化特征明显,多依靠地下水或者降水转化的浅层土壤水补给,相较于生长季降水量,极端降水特别是大量级降水增多,降水集中期延后或更有利于荒漠灌木植物的生长。榆林站点的主要植物群落为温带丛生禾草典型草原,其植物主要为真旱生与广旱生多年生丛生禾草,冬春季节受蒙古高压中心的控制,寒冷干燥,夏季受东南季风的影响,温和而湿润,从而形成短促而十分有效的生长季[32],根系较浅,受生长季降水量变化的影响较大。

$NDVI_{max}$与 PCP 的偏相关分析表明,降水集中时间的后移在一定程度上是有利于荒漠区植物生长的。李晓兵等[33]的研究也指出,随着区域增温,植物生长期开始提前,生长季延长。对于植被稀疏的干旱区而言,降水集中期延后在一定程度上可以缓解植物生长季后期因温度升高蒸发加大所导致的缺水问题,从而有利于植物生长。

5 结 论

2000—2017 年 4 个研究站点生长季降水量呈东西 2 个站点增加,中间 2 个站点减少的趋势。PCD 是西部 2 个站点增高,东部降低,但是变化特征并不显著。研究区的 PCP 都有延后的趋势,表明降水集中时间有不同程度的后移。

2000—2017 年研究区 4 个站点 $NDVI_{max}$均表现出显著地增长趋势,说明研究区植物生长状况在逐渐向好。$NDVI_{max}$与降水特征的偏相关分析结果表明:以榆林地区为主要代表的荒漠草原区对生长季降水量较为敏感,降水在生长季分配均匀(即小量级降水的增多),有利于植物生长;在以蔡家湖、红柳河和民勤为代表的荒漠灌木植被区 PCD 与 PCP 对 $NDVI_{max}$的影响均大于生长季降水量,说明这 3 个站点的 $NDVI_{max}$值的年际变化主要取决于 PCD 与 PCP 的变动,且降水越集中(即极端降水增多,降水量级增大),越有利于 $NDVI_{max}$的增加。

在北方荒漠区,单纯的以降水量来表征降水变化对植被的影响并不合理。降水的分配特征和集中时间也是降水变化的重要特征,可能直接影响降水的有效性和植被对降水的利用效率,导致不同区域间降水效应的差异[34]。另外,植被类型以及水分利用方式的不同,也可能是导致不同地区 $NDVI_{max}$对降水特征的敏感性产生差异的重要原因。

参考文献(References):

〔1〕 Ehleringer J R,Phillips S L,Schuster W S F,et al. Differential utilization of summer rains by desert plants〔J〕. Oecologia,1991,88(3):430－434.

〔2〕 Schwinning S,Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems〔J〕. Oecologia,2004,141(2):211－220.

〔3〕 Wang J J,Pei T F,Gu W L,et al. Non-uniformity index of annual precipitation distribution〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2007,26(9):1 364－1 368.

〔4〕 唐金,李霞,牛婷. 古尔班通古特沙漠南缘近 10 年 NDVI 变化趋势与气象因子的关系〔J〕. 水土保持通报,2011,31(6):171－174.〔Tang Jin,Li Xia,Niu Ting. Relationship between NDVI and climate factors in south of Gurbantunggut Desert in past 10 years〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(6):171－174.〕

〔5〕 周梦甜,李军,朱康文,等. 西北地区 NDVI 变化与气候因子的响应关系研究〔J〕. 水土保持研究,2015,22(3):182－187.〔Zhou Mengtian,Li Jun,Zhu Kangwen,et al. Changes of NDVI in different region of northwest area and its responses to climate factor〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2015,22(3):182－187.〕

〔6〕 郑艺,张丽,周宇,等. 1982—2012 年全球干旱区植物变化及驱动因子分析〔J〕. 干旱区研究,2017,34(1):59－66.〔Zheng Li,Zhang Li,Zhou Yu,et al. Vegetation change and its driving factors in global drylands during the period of 1982－2012〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(1):59－66.〕

〔7〕 韩辉邦,马明国,马守存,等. 近 30 a 青海省植物变化及其气候驱动因子分析〔J〕. 干旱区研究,2017,34(5):1 164－1 174.〔Han Huibang,Ma Mingguo,Ma Shoucun,et al. Vegetation change and its driving climatic factors in Qinghai province in recent 30 years〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(5):1 164－1 174.〕

〔8〕 焦伟,陈亚宁,李稚. 西北干旱区植物净初级生产力的遥感估算及时空差异原因〔J〕. 生态学杂志,2017,36(1):181－189.〔Jiao Wei,Chen Yaning,Li Zhi. Remote sensing estimation and the reasons for temporal-spatial differences of vegetation net primary productivity in arid region of Northwest China〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2017,36(1):181－189.〕

〔9〕 Roerink G J,Menenti M,Su Z W,et al. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing〔J〕. Physics

& Chemistry of the Earth,2002,28(1):103 – 109.

〔10〕 Defries R,Townshend J. NDVI-derived land cover classification at global scales〔J〕. International Journal of Remote Sensing,1994,15(17):3 567 – 3 586.

〔11〕 牟乐,芦奕晓,杨惠敏,等. 1981—2015 年中国西北牧区植物覆盖的时空变化〔J〕. 干旱区研究,2018,35(3):615 – 623.〔Mu Le,Lu Yixiao,Yang Huimin,et al. Spatiotemporal variation of vegetation cover in the pastoral area in Northwestern China during the period of 1981 – 2015〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):615 – 623.〕

〔12〕 董喆,贺康宁,王根柱,等. 北川河流域降水与 NDVI 变化特征及其对径流的影响〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):287 – 295.〔Dong Zhe,He Kangning,Wang Genzhu,et al. Variation of precipitation and vegetation NDVI and their effects on stream flow in the Beichuan river basin〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):287 – 295.〕

〔13〕 朴世龙,贺金生,方精云,等. 中国草地植物生物量及其空间分布格局〔J〕. 植物生态学报,2004,28(4):491 – 498.〔Piao Shilong,He Jinsheng,Fang Jingyun,et al. Spatial distribution of grassland biomass in China〔J〕. Acta Phytoecol Sinica,2004,28(4):491 – 498.〕

〔14〕 Brinkmann K,Dickhoefer U,Schlecht E,et al. Quantification of aboveground rangeland productivity and anthropogenic degradation on the *Arabian peninsula* using landsat imagery and field inventory data〔J〕. Remote Sensing of Environment,2011,115(2):465 – 474.

〔15〕 Gang F U,Wei S,Shaowei L I,et al. Modeling aboveground biomass using MODIS images and climatic data in grasslands on the Tibetan Plateau〔J〕. Journal of Resources and Ecology,2017,8(1):42 – 49.

〔16〕 任美锷. 中国自然地理纲要〔M〕. 北京:商务印书馆,1992.〔Ren Mei'e. Outline of China's Physical Geography〔M〕. Beijing:The Commercial Press,1992.〕

〔17〕 徐利岗,周宏飞,梁川,等. 中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究〔J〕. 水利学报,2008,39(8):1 002 – 1 011.〔Xu Ligang,Zhou Hongfei,Liang Chuan,et al. Multi-time scale variability of precipitation in the desert region of North China〔J〕. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(8):1 002 – 1 011.〕

〔18〕 王可丽,江灏,赵红岩,等. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送〔J〕. 水科学进展,2005,16(3):432 – 438.〔Wang Keli,Jiang Hao,Zhao Hongyan,et al. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China〔J〕. Advance in Water Science,2005,16(3):432 – 438.〕

〔19〕 Zhang Lujun,Qian Yongfu. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations〔J〕. Acta Meteorologica Sinica,2003,17(2):146 – 163.

〔20〕 张运福,胡春丽,赵春雨,等. 东北地区降水年内分配的不均匀性〔J〕. 自然灾害学报,2009,18(2):89 – 94.〔Zhang Yunfu,Hu Chunli,Zhao Chunyu,et al. Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation in Northeast China〔J〕. Journal of Natural Disasters,2009,18(2):89 – 94.〕

〔21〕 张天宇,程炳岩,王记芳,等. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征〔J〕. 高原气象,2007,26(4):843 – 853.〔Zhang Tianyu,Cheng Bingyan,Wang Jifang,et al. Temporal and spatial change characteristics of precipitation-concentration degree (PCD) and precipitation-concentration period (PCP) over north China in rainy reason〔J〕. Plateau Meteorology,2007,26(4):843 – 853.〕

〔22〕 Li X,Jiang F,Li L,et al. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index,concentration degree and concentration period in Xinjiang,China〔J〕. International Journal of Climatology,2011,31(11):1 679 – 1 693.

〔23〕 Li B,Chen Y,Shi X,et al. Temperature and precipitation changes in different environments in the arid region of Northwest China〔J〕. Theoretical & Applied Climatology,2013,112(3 – 4):589 – 596.

〔24〕 Wang H,Chen Y,Chen Z. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region,Northwest of China,during 1960 – 2010〔J〕. Hydrological Processes,2013,27(12):1 807 – 1 818.

〔25〕 李栋梁,邵鹏程,王慧,等. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展〔J〕. 高原气象,2013,32(1):305 – 314.〔Li Dongliang,Shao Pengcheng,Wang Hui,et al. Advances in research of the North boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China〔J〕. Plateau Meteorology,2013,32(1):305 – 314.〕

〔26〕 郑新倩,郑新军,李彦. 准噶尔盆地南缘降水脉冲量级分布及其变化规律〔J〕. 干旱区研究,2012,29(3):495 – 502.〔Zheng Xinqian,Zheng Xinjun,Li Yan. Distribution and change of different precipitation pulse sizes in the southern marginal zone of the Junggar Basin,China〔J〕. Arid Zone Research,2012,29(3):495 – 502.〕

〔27〕 李奇虎,马庆勋. 1960—2010 年西北干旱区极端降水特征研究〔J〕. 地理科学,2014,34(9):1 134 – 1 138.〔Li Qihu,Ma Qingxun. Extreme precipitation features of arid regions in Northwest of China〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2014,34(9):1 134 – 1 138.〕

〔28〕 王海军,张勃,赵传燕,等. 中国北方近 57 年气温时空变化特征〔J〕. 地理科学进展,2009,28(4):643 – 650.〔Wang Haijun,Zhang Bo,Zhao Chuanyan,et al. The spatio-temporal characteristics of temperature change in recent 57 years in Northern China〔J〕. Progress in Geography,2009,28(4):643 – 650.〕

〔29〕 李巧梅,曾勇,孙钦明,等. 决定古尔班通古特沙漠短命植物分布的关键因子是 5 月降水〔J〕. 生态学杂志,2014,33(8):2 038 – 2 045.〔Li Qiaomei,Zeng Yong,Sun Qinming,et al. Precipitation in may is a key factor to determinate the distribution of ephemeral plants in Gurbantünggüt Desert〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2014,33(8):2 038 – 2 045.〕

〔30〕 王雪芹,蒋进,雷加强,等. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义〔J〕. 地理学报,2003,58(4):598 – 605.〔Wang Xueqin,Jang Jin,Lei Jiaqiang,et al. The distribution of ephemeral vegetation on the longitudinal dune surface and its stabi-

lization significance in the Gurbantünggüt Desert〔J〕. Acta Geographica Sinica,2003,58(4):598 - 605.〕

〔31〕吴玉. 准噶尔盆地南缘荒漠植物对小降雨事件的生理响应〔D〕. 北京:中国科学院大学,2014.〔Wu Yu. Physiological Responses of Desert Plants to Small Rainfall Events at the South Periphery of Junggar Basin〔D〕. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2014.〕

〔32〕马瑞芳. 内蒙古草原区近50年气候变化及其对草地生产力的影响〔D〕. 北京:中国农业科学院,2007.〔Ma Ruifang. Cliamte Change During the Past 50 Years and Its Impact on the Production Ability in Inner Mongolia Grassland〔D〕. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation,2007.〕

〔33〕李晓兵,陈云浩,张云霞,等. 气候变化对中国北方荒漠草原植物的影响〔J〕. 地球科学进展,2002,17(2):254 - 261.〔Li Xiaobing, Chen Yunhao, Zhang Yunxia, et al. Impact of climate change on desert steppe in Northern China〔J〕. Advance in Earth Sciences,2002,17(2):254 - 261.〕

〔34〕王志鹏,张宪洲,何永涛,等. 2000—2015年青藏高原草地归一化植物指数对降水变化的响应〔J〕. 应用生态学报,2018,29(1):75 - 83.〔Wang Zhipeng, Zhang Xianzhou, He Yongtao, et al. Responses of normalized difference vegetation index(NDVI) to precipitation changes on the grassland of Tibetan Plateau from 2000 to 2015〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(1):75 - 83.〕

Correlation between Precipitation and NDVI in Vegetation Growing Season in a Typical Desert in North China

LI Ya-feng[1,2,3], TANG Li-song[1,3]

(1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;

3. *Fukang Station for Desert Ecosystem Research, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Fukang* 831500, *Xinjiang, China*)

Abstract: Precipitation change in vegetation growing season is an important factor causing inter-annual fluctuation of vegetation growth. The correlation between $NDVI_{max}$ and precipitation in vegetation growing season in a typical desert in north China was analyzed using the MODIS normalized vegetation dataset and the daily precipitation data from May to September during the period of 2000 - 2017. The results indicated that the values of $NDVI_{max}$ in four sample plots in the study area were in an increase trend from 2000 to 2017. Precipitation in the study area in vegetation growing season was in an increase-decrease-increase trend. The precipitation concentration degree (PCD) was high in the west but low in the east, and it became later in the study area. In addition to Yulin, the effects of PCD and PCP on $NDVI_{max}$ in other three sample plots were higher than that of precipitation, which revealed that the inter-annual fluctuation of $NDVI_{max}$ values in these sample plots was mainly affected by the changes of PCD and PCP, and there were the positive correlations among them. In Yulin, however, the $NDVI_{max}$ had a positive correlation with the precipitation in vegetation growing season, but a negative one with PCD, and its correlation with the precipitation in vegetation growing season was the highest, indicating that the vegetation growth to precipitation in vegetation growing season was more sensitive.

Key words: NDVI; vegetation growing season; precipitation variation; precipitation concentration degree; precipitation concentration period; desert